



COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO À FLEXÃO COM APOIOS ENGASTADOS ENTRE VIGAS DE MADEIRA NATURAL E VIGAS DE MADEIRA ARMADA COM BARRAS DE AÇO CA-50 E RESINA EPÓXI

Bruno Kny Bonfante (1), Márcio Vito (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1)bruno_kb@hotmail.com, (2)marciovito@unesc.net

RESUMO

Pesquisas relacionadas à utilização de reforços em estruturas de madeira estão sendo aprimoradas com o propósito de possibilitar elementos de menores dimensões e maior resistência, proporcionando economia. Desenvolveu-se neste trabalho um sistema composto, através de vigas de madeira *Eucalyptus Citriodora* reforçadas com barras de aço CA-50, e coladas com resina epoxilica. O objetivo foi comparar o desempenho à flexão entre vigas convencionais de madeira e vigas armadas, com simulação de vínculos engastados. Foram criados dois grupos de amostras de mesma seção e comprimento, dividindo-se entre as vigas convencionais e as armadas. No laboratório, foram realizados ensaios de umidade da madeira, de aderência entre a resina/madeira e resina/aço, e de flexão estática com vínculos rígidos, através de um sistema em aço estrutural montado para esta proposta. Os resultados demonstraram bom funcionamento do sistema de apoios engastados, proporcionando solicitação de esforços às barras de aço, e consequente aumento de desempenho e rigidez das vigas. A carga de ruptura das amostras armadas superou em 82% a das referenciais, e o ganho de rigidez foi de 34%. Foram analisados os modos de ruptura das peças, buscando compreendê-los e compará-los aos modelos defendidos por outros autores.

Palavras chave: Madeira Armada, Resina Epoxilica, Barra de Aço, Simulação de Engastamento

1. INTRODUÇÃO

A madeira, como material de construção, é utilizada pelo homem desde épocas pré-históricas. Até o século XIX, as mais importantes obras de engenharia eram construídas com pedra ou madeira, estando em muitas vezes combinados os dois materiais (PFEIL, 2003).

Alguns dos motivos que fazem da madeira um material tão difundido na construção civil são defendidos por Zenid:

A madeira possui diversas propriedades que a tornam muito atraente frente a outros materiais. Dentre essas, são comumente citados o baixo consumo de energia para seu processamento, a alta resistência específica, as boas características de isolamento térmico e elétrico, além de ser um material muito fácil de ser trabalhado manualmente ou por máquinas. (2010, p. 01).

Martins (2010, p.01) afirma que, com uma relação peso-resistência muito favorável, a madeira é um material capaz de transmitir tanto tensões de compressão como tração, e por consequência é um material naturalmente apropriado para elementos sujeitos a esforços de flexão.

No entanto, um dos aspectos negativos mais citados ao se falar de estruturas de madeira são as deformações excessivas. De acordo com Pfeil (2003, p.96), “as limitações de deformações têm, em obras de madeira, importância relativamente maior que em outros materiais, como aço e concreto armado. Isso porque se trata de um material com alta relação resistência/rigidez”. Pfeil (2003, p. 29) explica ainda que “[...] as células da madeira quando comprimidas são achatadas precocemente, apresentando grandes deformações”.

Pesquisas relacionadas à utilização de reforços em estruturas novas têm sido aprimoradas com o propósito de suprimir a fragilidade do elemento, reduzindo as deformações e possibilitando elementos de menores dimensões e maior resistência, proporcionando assim economia. Pigozzo (2004), em sua tese de doutorado, propôs o uso de barras de aço como conectores em tabuleiros mistos de madeira e concreto para pontes, analisando o desempenho de diferentes tipos de resina. Cardoso (2013) utilizou de cabos de aço para reduzir a deformação vertical em vigas, enquanto Tiscoski (2014), e Carradore (2016), adotaram barras de aço CA-50 para o mesmo fim.

Este trabalho pretende analisar o desempenho de um sistema estrutural composto, tendo como objeto de estudos o comparativo entre vigas de madeira reforçadas, também com barras de aço CA-50, e vigas de madeira convencional, ambas de mesma seção transversal. Como diferencial às pesquisas citadas, seguiu-se o recomendado pelos autores para que as barras de aço pudessem ter maior colaboração no ganho de desempenho, e simulou-se apoios com vínculos de terceiro grau.

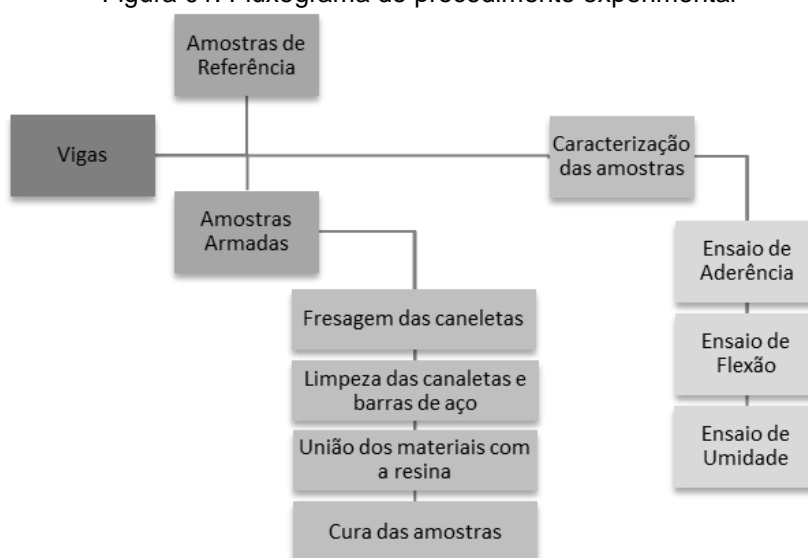
2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados no procedimento experimental foram: vigas de madeira do tipo *Eucalyptus Citriodora*, barras de aço CA-50, e resina epoxilica como ligante. Para os ensaios, foi realizada uma amostragem de seis vigas de madeira maciça, dividindo-se em duas peças de referência, e quatro amostras de madeira armada, sendo uma delas reservada para uso como peça piloto.

Cada um dos protótipos armados recebeu quatro barras de aço CA-50, ambas inseridas em canaletas dentro dos mesmos. As amostras foram submetidas a três ensaios: de flexão estática em quatro pontos para verificar o limite último de resistência, de aderência para analisar o desempenho entre resina/madeira e resina/aço, e ensaio de umidade para identificar o grau de umidade das amostras.

A Figura 01 apresenta um fluxograma demonstrativo dos procedimentos experimentais por etapas.

Figura 01: Fluxograma do procedimento experimental



Fonte: Autor (2016)

2.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

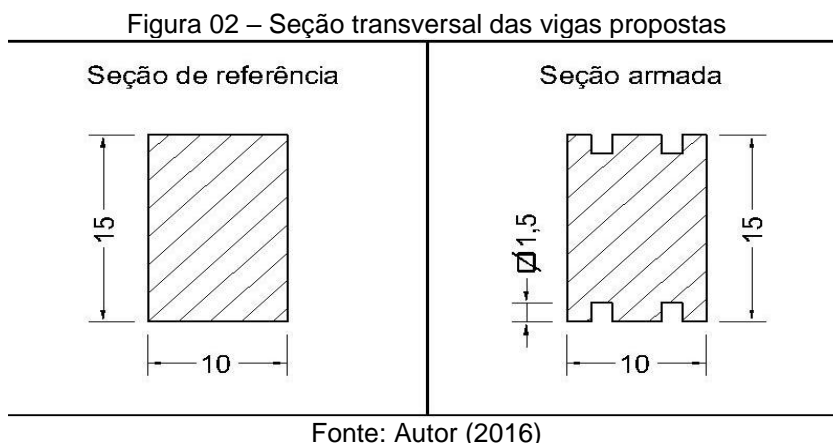
A escolha do *Eucalyptus Citriodora* é justificada por ser uma espécie de madeira comumente encontrada no mercado da região sul de Santa Catarina, pois segundo dados do EMBRAPA (1988), é uma das espécies de eucalipto mais difundidas no Brasil, inclusive no litoral catarinense e nas regiões de menor altitude do Rio Grande do Sul. As propriedades mecânicas desta espécie estão demonstradas na Tabela 01, com dados obtidos a partir da ABNT NBR 7190/1997.

Tabela 01 – Propriedades do *Eucalyptus Citriodora*

Propriedades de Resistência e Rigidez	Resistência Padrão 12% (kN/cm ²)
Resistência à compressão (fc,0)	6,20
Resistência à tração paralela (ft,0)	12,36
Resistência à tração perpendicular (ft,90)	0,39
Resistência ao cisalhamento (fv,0)	1,07
Módulo de Elasticidade (E)	1.842,10

Fonte: NBR 7190/1997

A NBR 7190/1997, no item 10.2.1, discrimina que a seção mínima de uma viga de madeira deve conter área de 50 cm^2 , e largura de 5 cm. Para os ensaios propostos, foram montadas seis amostras com seção de $10 \times 15 \text{ cm}$, totalizando 150 cm^2 de área nas duas amostras de referência e, devido ao desconto das quatro canaletas de $1,5 \times 1,5 \text{ cm}$, 141 cm^2 nos quatro exemplares armados. A Figura 02 apresenta um croqui das seções descritas.



O comprimento adotado foi de 250 cm para todas as vigas, sendo 235 cm de vão teórico, uma vez que foi considerado 7,5 cm de apoio em cada extremidade.

2.1.1 Barras de aço

As barras que reforçaram as quatro vigas experimentais foram do tipo CA-50, nervuradas, com 8,0 mm de diâmetro nominal, e foram inseridas em todas as canaletas demonstradas na Figura 02. Desta forma, as mesmas contribuem tanto na resistência à tração, quanto na resistência à compressão.

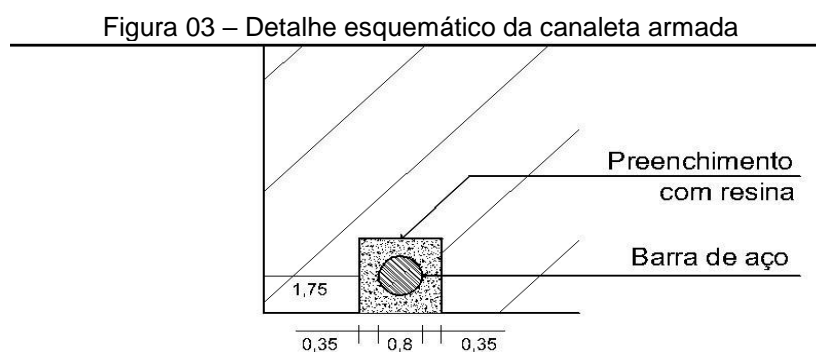
Como diferencial deste estudo, desenvolveu-se um vínculo rígido em aço estrutural, simulando o engastamento das barras de aço aos apoios, obtendo-se um resultado semelhante ao engaste das barras em uma base de concreto. A simulação teve o intuito de permitir que as propriedades mecânicas do aço dentro da madeira fossem solicitadas perante as deformações da viga.

2.1.2 Resina

A ligação entre as barras de aço e a madeira se deu através de um adesivo estrutural bi componente, sendo uma porção de resina epóxi, e outra de

endurecedor. O fabricante afirma que, por possuir pega lenta e consistência fluida, a homogeneização dos dois componentes resulta em uma resina de excelente aderência, tanto ao aço quanto à madeira. Ainda de acordo com as especificações do fabricante, o adesivo estrutural possui resistência à compressão de 70 MPa, e à tração na flexão de 36 MPa, ambas após os 7 dias de cura recomendados.

Na Figura 03 tem-se o demonstrativo do esquema de montagem das barras de aço dentro das canaletas, com os materiais e as dimensões especificadas.



Fonte: Autor (2016)

2.2 MONTAGEM DA VIGA ARMADA

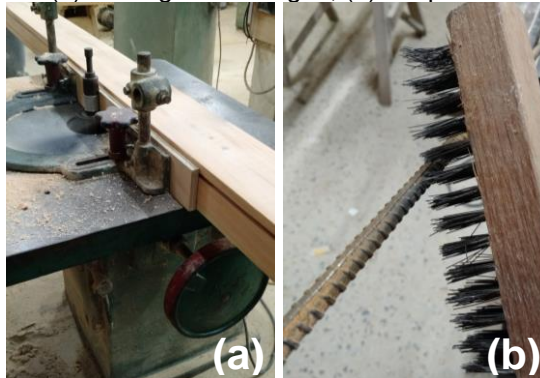
As seis vigas de madeira maciça foram separadas em dois grupos, o grupo “R” com as duas peças para ensaios de referência, e o grupo “E” com as quatro vigas para a confecção dos protótipos armados. O primeiro passo foi cortar as peças com o auxílio de uma serra circular de mesa, padronizando todas as vigas no comprimento de 250 cm, e já separando, com as devidas identificações, as sobras de aproximadamente 10 cm para os ensaios de umidade.

As canaletas das quatro vigas experimentais foram feitas utilizando-se de maquinário de marcenaria, neste caso uma tupa de mesa com ferramentas adaptadas para a fresagem na posição e profundidade especificadas (Figura 04-a).

Posteriormente se fez necessário um procedimento de limpeza através de jato de ar comprimido, com a finalidade de retirar quaisquer resíduos ou poeira das canaletas.

As barras de aço também demandaram de processo semelhante, sendo que anteriormente ao jato de ar as mesmas foram limpas com escova de aço para a remoção de pontos oxidados (Figura 04-b). O processo de limpeza tem como intuito garantir a correta aderência entre os materiais e a resina.

Figura 04: (a) Fresagem das vigas; (b) Limpeza das barras;

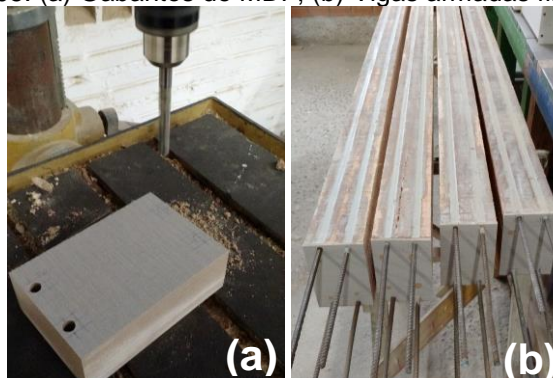


Fonte: Autor (2016)

Para centralizar o posicionamento das barras de aço dentro das canaletas, e evitar o derramamento de resina pelas extremidades, foram efetuados gabaritos em chapa de MDF com espessura de 6 mm, e fixados nas faces limites das vigas. Tal procedimento se mostrou necessário para que todas as peças apresentassem uniformidade nas distancias entre as barras, uma vez que as mesmas devem ser acopladas ao sistema de simulação de engastamento. Os gabaritos foram confeccionados com o auxílio de uma serra circular de mesa e de uma furadeira de bancada, os mesmos foram cortados e furados sobrepostos (Figura 05-a), para que não houvesse nenhuma variação dimensional.

Depois de realizada a homogeneização entre resina e endurecedor, nas proporções recomendadas pelo fabricante, foi derramada a primeira camada dentro da canaleta, seguindo com o posicionamento das barras de aço dentro das mesmas, e posteriormente com o preenchimento final dos vazios (Figura 05-b).

Figura 05: (a) Gabaritos de MDF; (b) Vigas armadas finalizadas



Fonte: Autor (2016)

Dado o período de 24 horas, estabelecido pelo fabricante para o endurecimento da resina, as vigas foram viradas, e os processos citados repetidos para a colagem das barras no lado oposto dos protótipos. As vigas foram armazenadas, sem qualquer tipo de movimentação ou choque, durante os sete dias estabelecidos pelo fabricante

para a cura da resina, com a finalidade de obter-se todas as especificações técnicas e de resistência exigidas para o estudo.

2.3 ENSAIO DE ADERÊNCIA

A verificação das tensões máximas de aderência entre madeira/resina e aço/resina foi baseada no ensaio do tipo “push-in”, desenvolvido por Silva (2014). A partir de tal ensaio pode-se determinar uma possível causa da ruptura da viga, uma vez que há a possibilidade de a mesma estar relacionada com a ligação entre os materiais. Logo, o objetivo deste ensaio é mensurar o desempenho de colagem entre a resina e os materiais usados, demonstrando o quão eficaz é o adesivo adotado.

Foram ensaiadas três amostras para cada material, com a força máxima de resistência medida ao ponto do escorregamento entre as superfícies aderidas. O comprimento de ancoragem adotado foi de 5,0 cm, com apenas a barra de aço recebendo tensão axial no ensaio aço/resina, enquanto no ensaio madeira/resina a tensão se concentrou na seção da área de resina.

As tensões citadas foram aplicadas nas amostras a partir de uma prensa hidráulica modelo EMIC PC200CS, com 2000 kN de capacidade, e os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), no Iparque – UNESC.

2.4 ENSAIO DE UMIDADE

“Há muito tempo sabe-se que a resistência da madeira varia com seu teor de umidade. Com o aumento do teor de umidade da madeira observa-se uma diminuição em sua resistência [...]” (LOGSDON; CALIL, 2002).

Embasado no que citam os referidos autores, e de forma a obedecer ao que prescreve a norma ABNT NBR 7190/1997, se faz necessário descobrir o grau de umidade das amostras, possibilitando-se assim a correção do módulo de elasticidade das mesmas para a umidade de referência da madeira (12%). Tal correção viabiliza a comparação direta das resistências mecânicas das amostras, pois padroniza uma variante que interfere diretamente no desempenho da madeira.

O ensaio consiste na determinação da massa específica inicial dos corpos de prova, e posteriormente na secagem dos mesmos em estufa até que se atinja massa

constante. Foram retiradas três amostras de cada uma das vigas ensaiadas, ambas nas dimensões normatizadas pela ABNT NBR 7190/1997: “O corpo-de-prova deve ter seção transversal retangular, com dimensões nominais de 2,0 cm x 3,0 cm e comprimento, ao longo das fibras, de 5,0 cm [...]”.

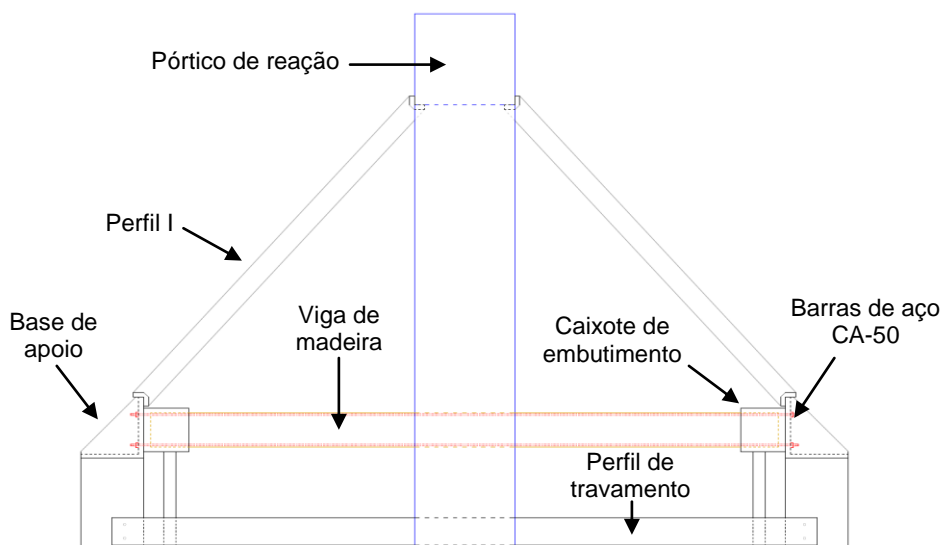
Os equipamentos utilizados nesta etapa foram uma balança de precisão modelo Marte AS-5500C, e uma estufa micro processada de secagem Quimis Q317M-32, sendo os ensaios realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), do Iparque – UNESC.

2.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Todas as amostras passaram pelo ensaio de resistência à flexão estática em 4 pontos, foi através dele que se obteve os valores de resistência das vigas de referência e das vigas armadas.

Foram simulados vínculos de terceira classe através do engastamento rígido dos apoios das vigas. Tal simulação foi possível através de um sistema montado especialmente para esta proposta, o mesmo foi confeccionado com aço estrutural, consistindo em bases de apoio montadas com chapas de 19,0 mm, e contraventamento através de perfis “I”. Nas bases de apoio foram executados quatro furos, para que as barras de aço provenientes das vigas armadas pudessem ser acopladas ao aparato, e soldadas nas faces externas do mesmo, proporcionando travamento ao conjunto. Junto às bases também foram confeccionados caixotes, com as mesmas chapas de 19,0 mm, e com a finalidade de proporcionar o embutimento das vigas, permitindo tanto a simulação de engaste das vigas armadas quanto das vigas de referência. O papel dos perfis “I” é o de não permitir o movimento de giro nos apoios, tornando os mesmos indeformáveis, e possibilitando assim a simulação pretendida. Todas as peças do sistema foram dimensionadas para suportarem ao carregamento limite da prensa hidráulica (250 kN por apoio), uma vez que não havia como estimar o ganho de desempenho que os protótipos proporcionariam. Através da amostra reservada para o ensaio piloto, foi possível montar, testar, e aperfeiçoar o sistema desenvolvido, descartando-se os resultados de resistência medidos. A Figura 06 demonstra um croqui esquemático do sistema citado, montado no pórtico de reação do Laboratório Experimental de Estruturas do Iparque – UNESC.

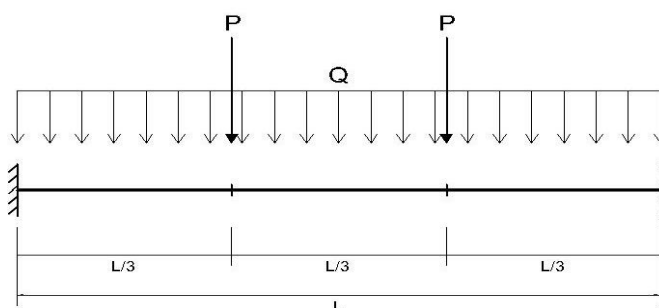
Figura 06: Sistema para simulação de engastamento



Fonte: Autor (2016)

O carregamento das vigas ocorreu na posição vertical, de cima para baixo, e localizado nos terços médios do vão teórico, conforme a Figura 07, e se deu através de um macaco hidráulico. Também foi considerada a ação do peso próprio como carregamento.

Figura 07 – Esquema de carregamento do ensaio de flexão



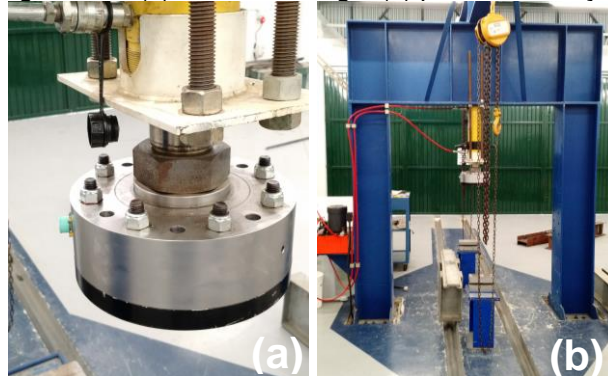
Fonte: Autor (2016)

Os equipamentos utilizados para o ensaio foram: três medidores de deslocamentos do tipo LVDT (HBM WA/100mm), ligados a um sistema de aquisição de dados (HBM Quantum x MX840 8 canais); um macaco hidráulico com capacidade de 500 kN, ligado a um pórtico de reação; uma célula medidora de carga (HBM U10M 500 kN), também ligada ao sistema de aquisição de dados citado.

O pórtico, conforme a Figura 08-b, é feito de aço estrutural e tem a função de reagir aos esforços aplicados nas amostras, possuindo elevada rigidez para que as forças de reação não interfiram nos resultados do ensaio. A célula de carga, demonstrada na Figura 08-a, foi posicionada entre o objeto de estudo e o macaco hidráulico, com

a finalidade de mensurar o carregamento nas vigas. Os ensaios foram realizados no laboratório Experimental de Estruturas do Iparque – UNESC.

Figura 08 – (a) Célula de carga; (b) pórtico de reação



Fonte: Autor (2016)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item tem-se a representação dos resultados obtidos através dos ensaios de flexão, de aderência, e de umidade. Propõe-se também algumas discussões e comparações acerca dos mesmos, com a finalidade de bem compreendê-los.

3.1 ENSAIO DE FLEXÃO

Os resultados deste ensaio foram extraídos em duas etapas, a primeira ao ponto da deformação limite especificada pela ABNT NBR 7190/1997 ($l/200$), e a segunda ao rompimento das vigas. O objetivo desta análise é tanto especificar o ganho de desempenho dentro da aplicabilidade da norma vigente para elementos estruturais, quanto obter resultados limites de resistência. A Figura 09-a demonstra uma viga durante o ensaio, com todos os equipamentos e o sistema de engastamento montados, enquanto a Figura 09-b demonstra o detalhe do travamento das barras.

Figura 09: (a) Viga durante ensaio de flexão; (b) Porcas soldadas nas barras de aço



Fonte: Autor (2016)

3.1.1 Viga de Referência

Durante o ensaio foram obtidas as forças máximas aplicadas pelo macaco hidráulico, que posteriormente foram convertidas em tensões. A Tabela 02 demonstra as tensões citadas, bem como as tensões calculadas com os coeficientes de modificação aplicados, levando em conta as influências do tempo de carregamento, do grau de umidade, e da presença ou não de defeitos nas peças, conforme especifica a ABNT NBR 7190/1997. Os resultados obtidos se mostraram semelhantes aos previstos em cálculo, demonstrando a eficácia dos métodos.

Tabela 02: Resultados das vigas de referência comparados com a NBR 7190/1997

Tabela 02: Resultados das vigas de referência comparados com a NBR 7190/1997				
Resistência de Ensaio das Vigas de Referência				
Amostra	Carga Máxima (kN)	E (kN/cm²)	of,d (kN/ cm²)	
R1	39,05	1442,54	4,08	
R2	34,96	1526,09	3,65	
Média	37,00	1484,32	3,86	
Desvio Padrão	2,89	59,08	0,30	
Resistência Normalizada				
Viga - base x altura x comprimento (cm)	Carga Máxima (kN)	E (kN/cm²)	fcw,0d (kN/cm²)	ft,0d (kN/cm²)
10 x 15 x 235	34,19	1842,10	3,57	7,12

Fonte: Autor (2016)

Onde:

E - módulo de elasticidade;

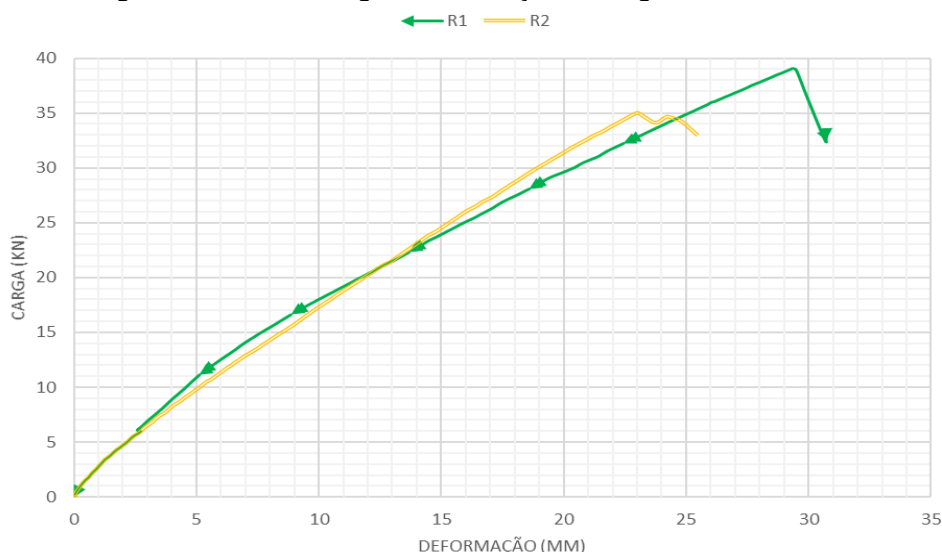
$\sigma_{f,d}$ - tensão de flexão atuante

fcw,0d – resistência à compressão paralela às fibras;

ft,0d - resistência à tração paralela as fibras;

Analisando a Figura 10 quanto à resistência das vigas, observa-se uma deformação constante na medida em que o carregamento aumenta, apresentando a partir de aproximadamente 37,00 kN deformações diferenciadas. Logo, a relação entre carga e deformação se manteve proporcional até próximo do limite de carregamento calculado, e teve aumento considerável de deformações após o momento da ruptura.

Figura 10: Gráfico Carga x Deformação das vigas de referência

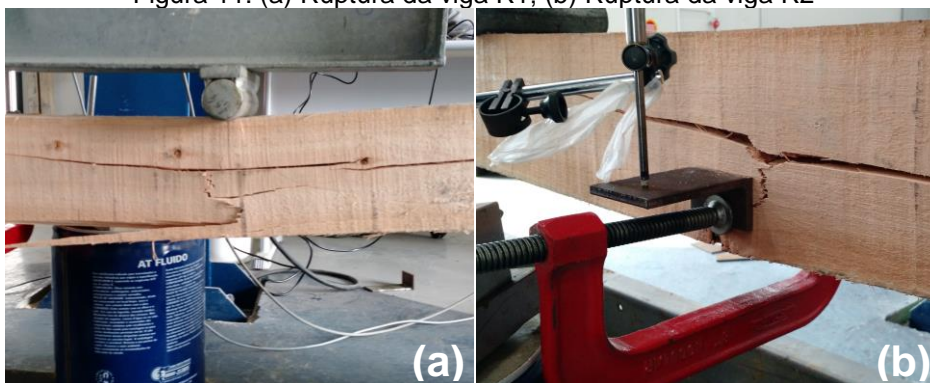


Fonte: Autor (2016)

De acordo com Calil (1998, p. 24), “quando a madeira é solicitada à flexão simples ocorrem quatro tipos de esforços: compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras, cisalhamento horizontal e nas regiões dos apoios compressão normal às fibras”. A ruptura nas duas vigas de referência, conforme a Figura 11, se deu através da compressão e esmagamento na parte superior das mesmas, levando a uma redução da área tracionada e ao consequente rompimento das fibras inferiores por tração. Tal modelo de ruptura é defendido por Calil (1998, p.24), através da afirmativa de que

[...] a ruptura em peças de madeira solicitadas à flexão ocorre pela formação de minúsculas falhas de compressão seguidas pelo desenvolvimento de enrugamentos de compressão macroscópicos. Este fenômeno gera o aumento da área comprimida na seção e a redução da área tracionada, podendo, eventualmente, romper por tração.

Figura 11: (a) Ruptura da viga R1; (b) Ruptura da viga R2



Fonte: Autor (2016)

Simultaneamente ao rompimento por tração, ocorreu o rompimento por cisalhamento, sendo visível através da rachadura próxima à linha neutra das amostras.

3.1.2 Viga armada

O carregamento máximo medido no ensaio das vigas se mostrou consideravelmente superior ao do ensaio das vigas de referência, assim como o módulo de elasticidade, o que indica um aumento de rigidez das peças experimentais e, por consequência, menores deformações verticais. A Tabela 03 demonstra as cargas medidas durante o ensaio, e traz também, a efeito comparativo, os dados obtidos com o ensaio das peças de referência.

Tabela 03: Resultados das vigas armadas comparados com as vigas de referência

Resistência de Ensaio das Vigas Armadas			
Amostra	Carga Máxima (kN)	E (kN/cm ²)	σ_f, d (kN/ cm ²)
E1	66,63	2094,95	6,95
E2	68,50	1891,71	7,15
Média	67,56	1993,33	7,05
Desvio Padrão	1,32	143,71	0,14
Resistência de Ensaio das Vigas de Referência			
Amostra	Carga Máxima (kN)	E (kN/cm ²)	σ_f, d (kN/ cm ²)
R1	39,05	1442,54	4,08
R2	34,96	1526,09	3,65
Média	37,00	1484,32	3,86
Desvio Padrão	2,89	59,08	0,30

Fonte: Autor (2016)

A Tabela 03 conta apenas com dois resultados de vigas armadas, ante as quatro amostras citadas. Um não foi considerado por ser o do ensaio piloto, onde o sistema de simulação de engastamento ainda estava sendo testado e aprimorado, e o outro resultado foi descartado devido a falhas presentes na madeira, neste caso uma rachadura atravessando transversalmente toda a seção e estendendo-se de uma das extremidades da viga até o primeiro terço médio do vão teórico. A presença de tal defeito resultou em um comportamento divergente ao demonstrado pelas amostras consideradas, destoando ao padrão dos resultados medidos, prejudicando assim as médias de carga máxima, módulo de elasticidade, e elevando o desvio padrão. Portanto foi considerado um dado falho estatisticamente, e não incluído nos

resultados. A Figura 12 demonstra o defeito citado, que se apresentava em menores proporções no momento da aquisição das vigas, e se propagou durante o tempo de espera para cura da resina e preparação do sistema de engaste no laboratório.

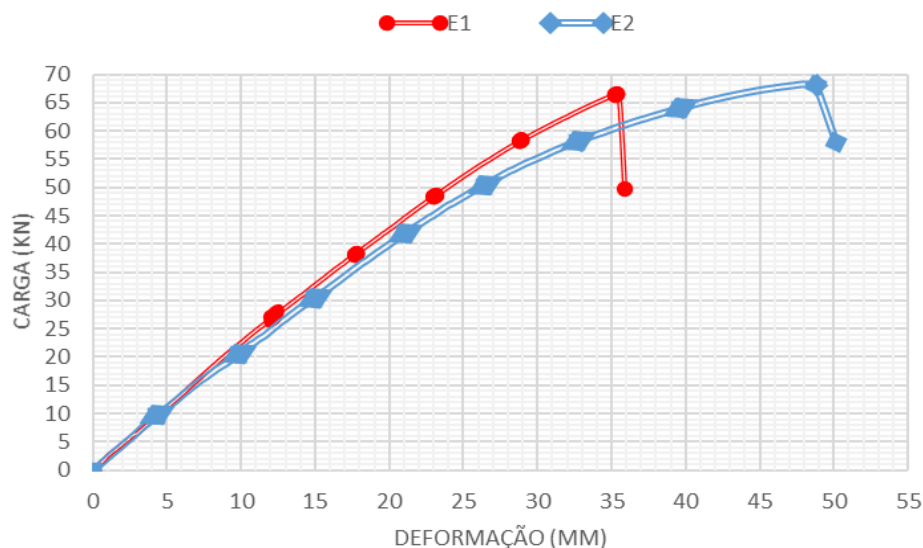
Figura 12: Defeito apresentado em uma das vigas



Fonte: Autor, (2016)

Ao observar-se os deslocamentos medidos, se faz possível afirmar que as amostras experimentais E1 e E2 tiveram comportamento similar, com a ressalva de que a segunda amostra manteve um comportamento linear até aproximadamente 55 kN, apresentando maiores deformações já partir deste ponto, apesar de o rompimento da peça ter surgido só com 68,50 kN de carga, enquanto a primeira apresentou deformação constante até a iminência da ruptura. A Figura 13 dá suporte a estas afirmações, demonstrando um gráfico com as curvas de cargas e deformações das vigas armadas.

Figura 13: Gráfico Carga x Deformação das vigas armadas



Fonte: Autor (2016)

A ruptura dos protótipos seguiu o mesmo padrão apresentado pelas vigas de referência, apresentando esmagamento por compressão na parte superior da seção, rompimento das fibras por tração na porção inferior, e cisalhamento próximo à linha

neutra. A Figura 14 demonstra os modos de ruptura das vigas experimentais E1 e E2.

Figura 14: (a) Ruptura da viga E1; (b) Ruptura da viga E2;



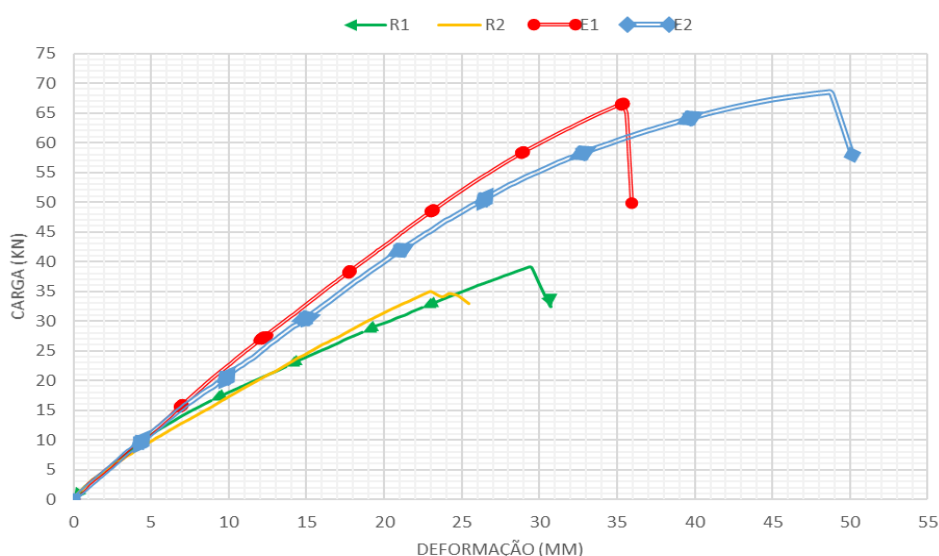
Fonte: Autor (2016)

3.1.3 Comparativo

Comparando diretamente os resultados obtidos, pode-se afirmar que as vigas armadas apresentaram ganho de desempenho tanto na resistência última de cargas, quanto na resistência ao limite de deformações especificado pela NBR 7190/1997, que para o vão teórico de 235 cm, foi de 11,75 mm.

Ao realizar-se a sobreposição das curvas de Carga x Deformação dos dois grupos de vigas, conforme a Figura 15, observa-se que os mesmos apresentaram curvas com inclinações distintas, confirmando o aumento na rigidez do grupo de peças armadas, como já demonstrado na Tabela 03 através dos módulos de elasticidade.

Figura 15: Gráficos Carga x Deformação sobrepostos



Fonte: Autor (2016)

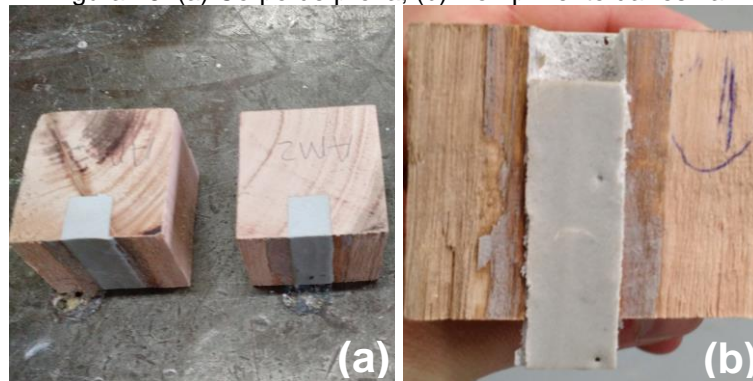
3.2 ENSAIO DE ADERÊNCIA

A NBR 7190/1997, no item 8.1.3, cita que “a resistência da junta colada deve ser no mínimo igual à resistência ao cisalhamento longitudinal da madeira”. Uma vez que os materiais trabalhem juntos, em um sistema composto madeira/resina/aço, a resistência limite passará a ser a própria resistência de cisalhamento longitudinal da madeira. Sendo assim, as tensões limites de aderência entre resina/aço também devem ser superiores às de cisalhamento longitudinal da madeira.

3.2.1 Resina / Madeira

Foram confeccionados três corpos de prova de 5 x 5 cm, com a mesma canaleta executada nas vigas armadas, e preenchidas com a resina utilizada, mantendo 5 cm de comprimento de ancoragem, de acordo com a Figura 16-a. A resina apresentou comportamento plástico, sendo amassada durante o carregamento, e cisalhando bem próxima ao contato com a madeira, conforme demonstrado na Figura 16-b.

Figura 16: (a) Corpo de prova; (b) Rompimento da resina



Fonte: Autor (2016)

A Tabela 04 apresenta os valores medidos durante o ensaio, que ficaram abaixo do cisalhamento longitudinal da madeira, tido como referência pela NBR 7190/1997 para o *Eucalyptus Citriodora*, com os coeficientes de modificação aplicados, como 0,62 kN/cm².

Tabela 04: Resultados do ensaio de aderência resina / madeira

Amostra	Força (kN)	Tensão (kN/cm ²)
CP1	5,59	0,25
CP2	6,43	0,28
CP3	6,10	0,27
Média	6,04	0,27
Desvio padrão	0,42	0,02

Fonte: Autor (2016)

3.2.2 Resina / Aço

As tensões de cisalhamento medidas durante este ensaio, além de ficarem abaixo dos $0,62 \text{ kN/cm}^2$ referenciados, também se mostraram inferiores às obtidas entre resina e madeira. A Tabela 05 demonstra os resultados.

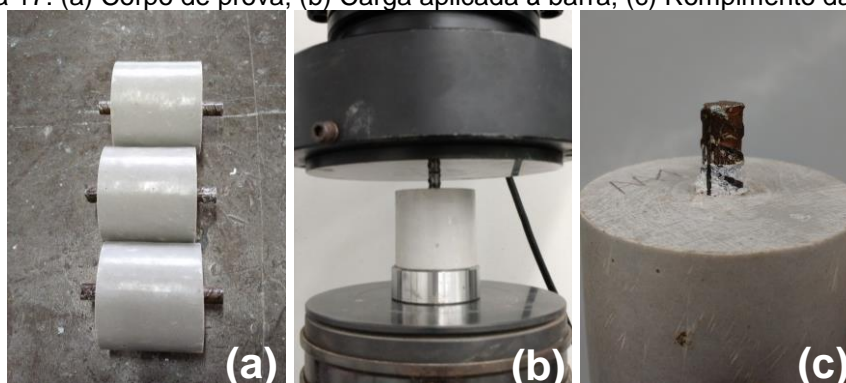
Tabela 05: Resultados do ensaio de aderência resina / aço

Amostra	Força (kN)	Tensão (kN/cm^2)
CP1	2,71	0,22
CP2	3,00	0,24
CP3	2,43	0,19
Média	2,71	0,22
Desvio padrão	0,28	0,02

Fonte: Autor (2016)

Durante o ensaio dos corpos de prova, a resina apresentou o mesmo comportamento citado anteriormente, demonstrando baixa rigidez e consequente amassamento nas áreas solicitadas pelas nervuras da barra de aço (Figura 17-c). Foram confeccionados três corpos de prova cilíndricos, com 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura, estando a barra de aço posicionada ao centro e com comprimento maior em 1 cm por face, conforme a Figura 17-a. O carregamento se deu diretamente sobre a barra de aço, conforme a Figura 17-b, e teve seu valor medido ao escorregamento da barra dentro da resina.

Figura 17: (a) Corpo de prova; (b) Carga aplicada à barra; (c) Rompimento da resina



Fonte: Autor (2016)

3.3 ENSAIO DE UMIDADE

Os resultados médios das aferições, de massas úmidas e secas, de cada um dos três corpos de prova confeccionados por viga estão demonstrados na Tabela 06. Todas as amostras se enquadram na classe de umidade 4, estabelecido pela NBR 7190/1997 para madeiras com teor de umidade acima de 25%.

Tabela 06: Resultados do ensaio de umidade

Amostra	Massa úmida (g)	Massa seca (g)	Teor de umidade (%)
R1	23,15	14,72	59,39
R2	22,18	13,88	59,12
E1	26,88	17,38	55,05
E2	24,53	15,86	54,97

Fonte: Autor (2016)

3.3.1 Correção de parâmetros

A NBR 7190/1997, no item 6.2.1, apresenta equações de correlação que permitem estimar tanto as resistências aos esforços atuantes, quanto o módulo de elasticidade para o teor de umidade padrão de 12%. As expressões foram desenvolvidas para teores de umidade entre 10% e 20%, assumindo-se que acima deste teor a resistência e a rigidez da madeira sofram apenas pequenas variações. A Tabela 07 apresenta os parâmetros de resistência e rigidez corrigidos para cada uma das quatro amostras consideradas.

Tabela 07: Correção dos parâmetros de resistência e rigidez

Correção das Vigas Armadas			
Amostra	Carga Máxima (kN)	E (kN/cm ²)	$\sigma_{f,d}$ (kN/cm ²)
E1	82,62	2430,14	8,62
E2	84,63	2194,38	8,87
Média	83,62	2312,26	8,74
Desvio Padrão	1,42	166,71	0,17
Correção das Vigas de Referência			
Amostra	Carga Máxima (kN)	E (kN/cm ²)	$\sigma_{f,d}$ (kN/cm ²)
R1	48,42	1673,35	5,06
R2	43,35	1770,26	4,53
Média	45,88	1722,30	4,80
Desvio Padrão	3,58	68,53	0,37
Calculada padrão NBR 7190/1997			
(12%)	59,36	1842,1	6,2

Fonte: Autor (2016)

4. CONCLUSÃO

Analisando os resultados obtidos, concluiu-se que o sistema de reforço de vigas com aço CA-50 aumenta o desempenho em relação às peças convencionais. O ganho na resistência última foi de 82%, com 34% mais rigidez, e desempenho superior em

30% na deformação limite especificada pela NBR 7191/1997. Ainda assim, esperava-se resultado superior, através de uma maior rigidez do composto resina/aço, o que não foi constatado neste estudo.

As barras de aço CA-50 apresentaram alongamento dimensional, aceitando assim maiores deformações, mas também demonstrando que as mesmas foram solicitadas perante as cargas. O alongamento foi constatado no momento da retirada das cargas, onde as vigas tiveram um retorno da flecha, e as porcas soldadas junto às barras, até então travadas nas bases de apoio, apresentaram folga em relação às mesmas.

A resina demonstrou comportamento plástico, deformando-se junto com as vigas, e não atendendo à especificação da NBR 7190/1997 quanto à colagem nos materiais. No entanto, Gardner (1994), após um estudo comparativo entre diferentes tipos de resinas, afirma que “[...] a resina epóxi é claramente o adesivo mais adequado para reforços ou colagens de elementos de aço em peças de madeira [...]”, e que, existindo muitos tipos de resina epóxi, “[...] os resultados obtidos para uma resina não pode ser extrapolada para prever o comportamento de outra resina”.

Contudo, o sistema de simulação de vínculos engastados teve bom funcionamento, comprovado através da aferição dos deslocamentos dos caixotes de embutimento, apresentando valores nunca superiores a 0,5mm. Outro fator que comprova o sucesso da simulação é o alongamento das barras de aço, já citado anteriormente, e que demonstra a resistência ao giro das bases.

Sugere-se a futuros estudos um comparativo entre o desempenho à aderência de resinas de diferentes fabricantes, e possivelmente de outros compostos químicos, determinando o melhor material para esta proposta. Outra sugestão está no uso de vigas de madeira laminada ou tratada, o que diminuiria consideravelmente o risco de imperfeições e defeitos nas amostras, evitando o problema ocorrido neste trabalho, bem como a comparação de elementos com barras de diferentes bitolas, avaliando seus alongamentos.

REFERENCIAS

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997.

BRASIL, Douglas Rodriguez. **Utilização de estruturas de aço na recuperação de estruturas de madeira**. 2008. 86p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, Rio de Janeiro.

CALIL JUNIOR, Carlito. **SET 406 – Estruturas de madeira**. 1998. São Carlos.

CARDOSO, Rafael De Bona. **Atenuar o deslocamento vertical em vigas de madeira utilizando cabo de aço**. 2013. 21 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma

CARRADORE, Felipe. **Estudo das propriedades mecânicas de vigas de madeira maciça armadas com barras de aço CA-50 fixadas com resina epoxilica**. 2016. 17 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Zoneamento ecológico para plantios florestais no estado de Santa Catarina**. 1988, 100p.

GARDNER, G. **Reinforced glued laminated timber system epoxy/steel timber composite material**. Pacific Timber Engineering Conference, 1994, p. 548-557.

LOGSDON, Norman Barros; CALIL, Carlito Junior. **Influência da Umidade nas Propriedades de Resistência e Rigidez da Madeira**. 2002. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos.

MARTINS, Tomás Francisco Ribeiro Mendes. **Dimensionamento de Estruturas de Madeira: Coberturas e Pavimento**. 2010. 151p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Técnica de Lisboa – IST, Lisboa/PT.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michele. **Estruturas de madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro, LTC. 2003, 225p.

SILVA, Bruno do Vale. **Proposição de um teste de aderência para o controle tecnológico da resistência à compressão do concreto**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2014.

TISCOSKI, Alexandra Longo. **Estudo das propriedades mecânicas de vigas de madeira maciça armadas com barras de aço CA-50 fixadas com resina epoxilica**. 2014. 17 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma

ZENID, Geraldo Jose. **Madeira na construção civil**. IPT. 2011.